

Optimization method of weld quality for water regeneration pipeline welding robot

Le Li Mingming Han Xinwen Liu Jiadong Wang

China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

With the widespread implementation of reclaimed water utilization projects, ensuring welding quality in reclaimed water pipeline systems has become critical. Welding robots have emerged as essential equipment for achieving efficient and high-quality welding processes. This study focuses on optimizing weld seam quality in reclaimed water pipeline welding robots, conducting an in-depth analysis of key influencing factors including welding process parameters, robotic motion control, and welding environment conditions. To address these challenges, we propose a comprehensive optimization framework encompassing intelligent process parameter optimization algorithms, precise trajectory planning with compensation mechanisms, and adaptive environmental control systems. Case studies demonstrate that the proposed optimization methods significantly enhance weld seam quality while reducing defect rates, thereby ensuring safe and reliable operation of reclaimed water pipeline engineering projects.

Keywords

reclaimed water pipeline; welding robot; weld quality; optimization method

再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法

李乐 韩明明 刘新文 王加栋

中建八局第二建设有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

随着再生水利用工程的广泛开展, 再生水管道焊接质量至关重要, 而焊接机器人是实现高效、高质量焊接的关键设备。本文聚焦再生水管道焊接机器人焊缝质量优化问题, 深入分析影响焊缝质量的主要因素, 包括焊接工艺参数、机器人运动控制、焊接环境等。针对这些因素, 提出一系列优化方法, 涵盖焊接工艺参数的智能优化算法、机器人运动轨迹的精确规划与补偿、焊接环境的适应性控制等方面。通过实际案例验证, 所提出的优化方法可显著提升再生水管道焊接机器人焊缝质量, 降低焊接缺陷率, 为再生水管道工程的安全可靠运行提供保障。

关键词

再生水管道; 焊接机器人; 焊缝质量; 优化方法

1 引言

再生水回用是缓解我国水资源短缺的重要手段, 而再生水管线作为再生水输送的关键基础设施, 其施工质量直接影响再生水的安全可靠运行。焊接是再生水管线连接的关键环节, 良好的焊接质量保证其长期运行中承受内水压、防渗漏和抗环境腐蚀的能力。再生水管道采用传统手工焊接方法, 存在焊接效率低, 焊接质量受操作者技术水平影响大, 劳动强度大, 作业环境恶劣等问题。随着自动化程度的提高, 焊接机器人以其高效率、高精度和高稳定性的特点, 逐步被应用于管道焊接领域。然而, 由于再生水管线材料规格多, 焊接环境复杂, 在焊接过程中易受多因素影响, 易产生气孔、

裂纹、未熔合等缺陷, 严重影响管线的综合性能。因此, 深入研究再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法具有重要的现实意义。

2 影响再生水管道焊接机器人焊缝质量的主要因素

2.1 焊接工艺参数

焊接工艺参数是影响焊接质量的一个重要因素。焊接电弧的热输入量取决于焊接电流与电压, 过高的电流或过高都会增加焊缝的熔宽, 增大余高, 甚至发生烧穿; 但电流过小或过低都会造成熔深不够, 造成焊缝不能完全熔合。过快的焊速将缩短熔池存在时间, 气体无法逸出, 容易产生气孔; 焊接速度过慢, 焊缝热影响区扩大, 晶粒粗大, 力学性能下降。引线长度过大, 焊丝电阻增加, 熔速增加, 溅射增加; 引丝长度过小, 对电弧稳定性有较大影响^[1]。

【作者简介】李乐(1985-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 中级工程师, 从事道路工程研究。

2.2 机器人运动控制

焊接机器人的运动控制精度对焊缝成形质量有很大影响。为满足焊接工艺的要求，机器人的轨迹、速度和加速度必须满足焊接工艺的要求。在管线焊接过程中，机器人需要沿管线圆周方向连续焊接，如果轨迹偏离太大，将导致焊缝出现错边和不均匀等缺陷。另外，在起动、制动和转向过程中，若不能很好地控制加速度，将导致焊接电弧不稳定，从而导致焊接缺陷的产生（图1）。



图1 焊接机器人

2.3 焊接环境

再生水管线的焊接环境一般比较复杂，可能会受到风、温、湿等多种因素的影响。当风速太大时，保护气体会被吹走，焊缝金属会与氧、氮等气体发生化学反应，从而产生气孔、氧化皮等缺陷。环境湿度过大，会使焊条、焊丝等焊接材料受潮，影响电弧稳定性，增加氢含量，造成焊缝开裂。环境温度过低，焊缝金属冷却速率过快，不能充分细化晶粒，导致焊缝韧性、抗裂性能下降^[2]。

2.4 管道材质与规格

再生水管道材料不同，其焊接性能存在较大差异，如不锈钢管导热系数高、线膨胀系数大，在焊接过程中容易出现变形、开裂等缺陷。为避免产生白口组织，必须严格控制球墨铸铁管的焊接线能量。此外，大直径厚壁管线对焊接线能量的要求更高，对焊接工艺要求更高^[3]。管道规格主要涉及公称直径和壁厚。公称直径根据再生水的水量需求、流速等因素确定，以满足输送能力；壁厚则依据管道的工作压力、埋设深度及土壤条件等设计，确保管道在运行过程中有足够的强度和刚度，保障再生水安全、稳定输送，减少泄漏等事故的发生。

3 再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法

3.1 焊接工艺参数智能优化算法

再生水管线焊接机器人的焊接质量主要由焊接电流、焊接电压、焊接速度和伸出长度等因素决定。传统方法主要

依靠人工经验和试凑法确定参数，耗时耗力，难以与复杂多变的焊接场景进行精确匹配，造成焊接质量不稳定。智能优化算法是一种高效的求解方法，其典型代表就是遗传算法。该方法模拟生物进化的自然选择和遗传机理，对焊接工艺参数进行编码，形成初始种群。利用熔深、熔宽、缺陷率等焊接质量指标，构建适合度函数，实现对焊接过程中的个体的评价。通过选择操作保留优质个体，交叉操作交换基因信息生成新的个体，通过变异操作引入随机变异提高种群多样性。通过多次迭代，逐步逼近最佳参数组合；微粒群算法也有很好的表现。该算法把各参数组合作为粒子进行飞行搜索。粒子根据自己的历史最佳位置以及种群的历史最佳位置来调整自己的速度和方向，从而达到快速收敛的目的。结合焊接实验数据，建立焊接工艺参数与焊缝质量之间的数学模型，采用智能优化算法对模型进行求解，实现对焊接工艺参数的快速精确求解，有效提高焊接质量，降低气孔、裂纹等缺陷，提高焊接效率和稳定性^[4]。

3.2 机器人运动轨迹精确规划与补偿

在再生水管线焊接过程中，机器人的运动轨迹是否准确直接关系到焊缝成形的质量。通过离线编程，实现对机器人轨迹的预先规划。根据管线的几何尺寸和焊接工艺要求，建立管线及机械手的三维模型，实现对焊缝轨迹的准确计算（图2）。在此基础上，综合考虑机器人的运动学与动力学特性，对其运动轨迹进行优化，以保证机器人运动过程中的速度和加速度平稳，避免因急停急启造成的焊接电弧不稳定性；但在实际焊接过程中，由于管线的安装误差和机器人的位置误差，使得实际的焊接轨迹与规划轨迹有一定的偏差。为实现这一目标，需要引入传感器来实现实时监控和补偿。激光跟踪仪可实现对机器人实际位姿的高精度测量，并将测量结果反馈给控制器。利用位置误差反馈、力/力矩阻抗补偿等补偿算法，对机器人的运动指令进行实时修正，使机器人回归规划轨迹；利用视觉传感器对焊缝进行实时采集，并利用图像处理技术提取焊缝特征，对机器人的运动是否精确进行判断。在此基础上，对焊接工艺参数进行调整，确保焊缝对齐，避免出现错边、不连续等缺陷，提高焊接质量，满足再生水管道的长周期稳定运行需求^[5]。

3.3 焊接环境适应性控制

再生水管线的焊接环境复杂多变，受风场、湿度和温度等多种因素的影响。当风速太大时，保护气体被吹走，焊缝金属接触氧、氮，形成气孔、氧化铁皮。因此，通过设置防风棚，有效地降低焊接速度，创造相对稳定的焊接环境。同时，根据风速的变化，对保护气体的流量及成分进行适当的调整，以保证对焊缝的充分保护；环境湿度过大，焊接材料受潮，电弧稳定性下降，氢含量增加，容易产生裂纹。处理方法包括：用加热设备预热、干燥焊条和焊丝，除去湿气。通过增加焊接电流、提高焊接电压、增加电弧能量等措施，克服湿度对焊接质量的影响；在低温环境中，焊缝金属

因冷却速率过快而不能细化晶粒,导致材料的韧性及抗裂性下降。采用预热处理工艺提高管线的温度,降低管线的冷却速率。采用低氢电极,多层多道焊接,选用适当的材料及工艺,可减少裂纹的发生。通过对焊接环境因素的综合控制,为焊接机器人创造合适的作业环境,从而保证焊接质量的稳定可靠。

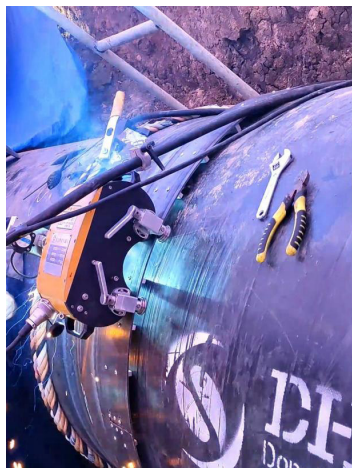


图2 焊接机器人焊缝

3.4 基于多信息融合的焊缝质量在线监测与反馈控制

为实时掌握焊缝质量,及时调整焊接工艺,采用多源信息融合技术对焊接过程进行在线监控和反馈控制具有重要意义。该系统集成用于监测焊接电信号的电流和电压传感器、焊缝及其周围温度的温度传感器、焊缝表面的可视化检测、焊缝内部缺陷的超声/射线传感器等。

在此基础上,采用多源信息融合算法,综合分析传感器采集到的数据,提取焊缝几何尺寸、表面粗糙度、内部缺陷种类和位置等与焊缝质量密切相关的特征参量。建立焊接质量与工艺参数间的动力学模型,实现对焊接质量的实时评价。当焊接质量异常时,反馈控制系统会快速响应,按照预先设定的控制策略对焊接工艺参数进行调整。当检测到焊缝熔深不够时,系统会自动增加焊接电流或者减慢焊接速度;如发现表面有气孔,应及时调节保护气流或焊接环境。本以再生水管道焊接机器人为研究对象,通过闭环控制,实时动态优化焊缝质量,保证再生水管道焊接机器人始终处于最佳工作状态,有效提升焊接质量稳定性与一致性,保证再生水管道工程安全可靠运行。

4 实际案例分析

以某再生水管道工程为例,利用焊接机器人完成管线的

焊接,管线的直径800 mm,壁厚10 mm。焊接初始阶段,焊接工艺参数设定不合理,机器人运动控制精度不高,焊接环境干扰严重,焊缝缺陷率高达15%。

针对以上问题,提出一种焊接质量优化方法。首先,采用遗传算法优化焊接工艺参数,经多次迭代,最终确定2020 A,24 V,18 cm/min的焊接速度。在此基础上,通过离线编程实现机器人轨迹的精确规划,并采用激光跟踪器实时补偿机器人的运动轨迹。同时,在焊接现场设置防风棚,将风速控制在1 m/s以内,同时对焊接材料进行预热干燥。在此基础上,采用多源信息融合技术实现焊缝质量在线监测,实现焊缝质量状态的实时监控,实现焊接工艺参数的实时调整。

在此基础上,通过对焊缝质量的检测,发现焊缝缺陷率明显下降到3%以内,熔深、熔宽、余高均达到设计要求,表面质量好,无气孔、裂纹、未熔合等缺陷。实践表明,该方法是可行的,可有效地改善再生水管道焊接质量,减少缺陷率。

5 结语

再生水管道焊接机器人的焊接质量优化是一项复杂的多学科、多因素综合问题。针对再生水管道焊接机器人焊接过程中存在的关键问题,从焊接工艺参数、运动控制、焊接环境等方面进行深入研究,提出焊接工艺参数智能优化算法、机器人运动轨迹精确规划与补偿、焊接环境自适应控制、多源信息融合的焊缝质量在线监控与反馈控制等关键技术。通过实例验证,可有效提高再生水管道焊接机器人焊接质量,降低焊接缺陷率,保障再生水管道安全可靠运行。在此基础上,结合人工智能、物联网等技术,对再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法进行研究与创新,为实现高品质、高效率的管线焊接提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘云松,杨帅,韩明明. 浅谈再生水管道焊接自动化技术应用与发展趋势[J]. 工程建设与发展,2025,4(5):107-109.
- [2] 郝国辉,刘伟,张新,等. 大直径DREC管道的复合式新型焊接接头施工技术[J]. 建筑施工,2019,41(10):1896-1898.
- [3] 杨成伟. 探析长输天然气管道焊接裂纹成因及控制措施[J]. 中国航班,2023(3):66-69.
- [4] 刘文亮. 再生水钢管施工质量控制研究[J]. 电脑校园,2019(11):2580-2581.
- [5] 王振民,宋哲龙,迟鹏,等. 类人机器人焊接技术研究现状与展望[J]. 机电工程技术,2025,54(4):1-13.